

Válaszok

Biró Tamás bírálataira

Köszönöm szépen a dolgozatom alapos áttekintését, a pozitív véleményt és a fontos és érdekes kérdéseket. Ezekre a válaszaim a következők.

6.1 *Miért csak 0 vagy 1 megmaradó áramot tekintenek a hidrodinamikai elemzésben? Mások 3 kémiai potenciált is relevánsnak tartanak a nehézion fizikában (elektromos/izospin, ritkaság, barion).*

Válasz Ezek a megmaradó áramok valóban fontosak egy realiztikus számolás esetén, és egyébként hidrodinamikai számolásokban is ki lehet indulni többkomponensű közegből. Ez ugyanakkor nem változtatja meg a fontosabb következtetéseket, azaz amikor a pionok azimutális anizotrópiáját vagy femtoszkópiai homogenitási hosszait számoljuk ki, akkor ennek nincs érdemi hatása a végeredményre, ugyanakkor több paraméterünk lesz. Mindamellettt készítettem olyan Buda-Lund-modellre alapuló számolást, ahol több kémiai potenciált is figyelembe vettem: ha a pionok mellett a protonok és kaonok spektrumait is le akarjuk írni, akkor erre szükség van. A dolgozatban említett analitikus megoldások esetében az egyszerűség kedvéért nem vettem ezeket figyelembe.

6.2 *Az exponenciális eloszlás, $\exp(-\epsilon/T)$, nem csak termikus egyensúly eredménye lehet, hanem számos más, a részletes egyensúly állapotát nélkülöző Markov folyamaté is. Egy ilyen fit egyes spektrumok korlátozott szakaszaira nem bizonyít termikus egyensúlyt. Ezt inkább többféle módon értelmezett hőmérsékletek (kinetikus, termodinamikai, kémiai, rezonanciák arányán alapuló, stb.) számszerű egybeesése tehetné hihetővé. Ám ezek az értékek általában nem esnek egybe. Mi erről a véleménye?*

Válasz A kérdés teljesen jogos, köszönöm. Mindenekelőtt azért azt látni kell, hogy nem egyszerűen egy $\exp(-E/T)$ eloszlásról van szó, a hidro- és termodinamikai számolásokból (még a legegyszerűbbekből is) ennél komplikáltabb alak jön ki. Másrészt igaz, hogy egyéb, mikroszkopikus számolásokból is kijöhet akár egészen részletesen is az az energiaeoszlás, amit észlelünk. Ugyanakkor nem csak spektrumokat mérünk, hanem azimutális anizotrópiákat, femtoszkópiai homogenitási hosszakat és egyéb mennyiségeket is. Bármilyen alternatív (nem termikus egyensúlyon alapuló) megközelítés számára az első feladat mindezen mennyiségeket megfelelően leírni. Ha ez teljesül, akkor az a megközelítés nem vethető el. A termodinamikai egyensúlyon (és a hidrodinamika egyenletein) alapuló modellek lényegében minden, alacsony impulzusú („bulk”) megfigyelhető mennyiséget részletesen leírnak, ilyen értelemben erős bizonyítékok állnak mellette rendelkezésre (vagyis nem sikerült cáfolni ezeket mindeddig). Fontos az is továbbá, hogy a kinetikus és kémiai hőmérsékleteknek nem is kell megegyezniük, hiszen történhet máskor a kinetikus és a hadrokémiai kifagyás. Én személy szerint úgy gondolom, hogy a különféle hidrodinamikai és termostatisztikai jellegű számolásokból kapott (azonos típusú) hőmérsékletek nem egyezése viszont a modellek hiányossága, ezekben bizonyos dolgokat (kezdeti dinamikát, a hidrodinamikai kezdeti állapotot, transzport együtthatókat) nem jól vesznek/veszünk figyelembe. Összességében pedig egyetlen kritérium van: mely modell írja le jól az összes adatot. Amely erre képes, azt nem zárhatjuk ki; amely erre nem képes, azt kizárhatjuk. Egy szigorú statisztikai elemzés alapján persze esetleg arra juthatnánk, hogy nincs minden mérést kielégítő modellünk jelenleg - innentől viszont szubjektívvá válik kicsit a kérdés.

6.3 *A „kis rendszert” a bemenő barionszám alapján definiálni nem teljesen kielégítő. Ugyanakkor a magas multiplicitású események kiválogatása hasonló szabadsági fok szám, n , és*

teljes energia, E , összehasonlítását jelentheti pp és AA ütközések között. Az esemény-fluktuációk miatti variancia relatíve magas lehet a kisebb rendszerek esetén. Ennek a lenyomata a p_T spektrumokban is meg kell, hogy jelenjen. Mi ennek a hatása T -re, a hidrodinamikában alkalmazott hőmérsékletre?

Válasz Teljesen jogos, hogy végső soron a rendszereket a végállapotú multiplicitás ($dN_{\text{ch}}/d\eta|_{\eta \approx 0}$) szerint lehet érdemes kategorizálni. Ez nemrégiben a PHENIX Nature Physics 15 (2019) 214–220 cikke kapcsán is felmerült, hogy a v_2 -t és v_3 -at mennyire okozzák a véges méret miatti fluktuációk, és mennyire az átlagos kezdeti geometria. Szemben a v_2 , v_3 , ..., v_n mennyiségekkel, amelyeket (szerintem) javarészt a kezdeti geometria befolyásol, a hőmérséklet tekintetében a hasonló multiplicitású események hasonlóan viselkednek. Ennél is tovább menve azt gondolom, hogy pp és AA ütközésekben ugyanúgy kialakulhat valamiféle nem teljesen hadronikus közeg, mindez leginkább multiplicitás kérdése (ahogy egyébként a Universe 3 (2017) 1, 9 [arXiv:1609.07176] cikkünkben ezt vizsgáltuk is). A fluktuációk p_T -eloszlásokra gyakorolt hatását egyébként úgy lehet vizsgálni, hogy jelentősen leszűkítjük a végállapotú jellemzők tartományát az adott mintában, és megvizsgáljuk a spektrum megváltozását. Tudomásom szerint teljesen ilyen vizsgálatot nem végeztek – ugyanakkor a centralitás leszűkítése például hasonlít egy ilyen mérésre. Viszont a centralitástartomány szűkítésekor nem változik érdemben a p_T -eloszlás, ami arra utal (de csak utal egyelőre talán), hogy a fluktuációk szerepe nem nagyon nagy ebben.

6.4 *A számolásokból kapott és hirdetett magas foton-hőmérsékletek vajon feketetest-spektrumokból származnak-e? Ha mégsem, akkor milyen információt hordoznak a kibocsátó közeg (korai QGP) saját hőmérsékletéről?*

Válasz Ezt a kérdést sajnos kísérleti alapon nem lehet eldönteni egyelőre, hiszen 4-5 adatpontnál nincsen több a lényeges tartományban, és azok is egy erőteljesen változó közegeből (időintegrált módon) származnak. Az világos, hogy a direkt fotonok spektrumának jelentős része (közepes és nagy p_T -nél) nem termikus jellegű - hiszen a felskálázott p+p pQCD-számolások szépen leírják ezeket. Ugyanakkor a kis p_T -nél látott „lágyművelet” eredetéről nehéz mást mondani, mint hogy termikus folyamatokból származik - ugyanis ezen termikus kibocsátáson alapuló számolások jól leírják ezt a növekményt is. Ebben a tekintetben a kapott hőmérséklet a QGP egyfajta átlagos hőmérsékletének tekinthető. Ugyanakkor itt is csak azt tudom mondani, hogy ha egy alternatív (pl. fékezési sugárzáson alapuló) számolás is leírja az adatokat (esetleg a v_2 -t is), akkor az ezen modell szcenáriójával is komolyan kell számolni. Végső soron pedig olyan méréseket kell kitalálni, amelyek dönteni tudnak a különféle mechanizmusok között.

Budapest,
2021. április 13.

Csánád Máté
ELTE Atomfizikai Tanszék